

焦炉用耐火材料的性能要求与发展趋势

王 芸

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041600

摘要：焦炉作为炼焦工业的核心热工设备，其运行效率、使用寿命及环保性能在很大程度上取决于所用耐火材料的性能。本文系统阐述了焦炉各关键部位（炭化室、燃烧室、蓄热室、炉顶及斜道区）对耐火材料的特殊性能要求，包括高温结构强度、热震稳定性、抗渣侵蚀性、体积稳定性及导热性能等。在此基础上，全面回顾了焦炉耐火材料的发展历程，从传统的黏土砖、硅砖到现代高性能硅砖及复合材料的应用。重点分析了当前焦炉耐火材料面临的主要挑战，如高温蠕变、碱金属侵蚀、热应力损伤及环保压力等。最后，结合材料科学、智能制造与绿色冶金的发展趋势，展望了焦炉耐火材料未来的发展方向，包括高纯化与微结构调控、复合化与功能梯度设计、智能化监测与寿命预测、低碳制备工艺以及循环利用技术等。本文旨在为焦炉耐火材料的研发、选型与工程应用提供理论参考与技术指导。

关键词：焦炉；耐火材料；硅砖；性能要求；发展趋势；绿色冶金

引言

炼焦工业是钢铁生产的关键环节，通过将炼焦煤高温干馏，产出冶金焦炭、焦炉煤气及化工副产品。焦炉作为核心热工设备，要在1300-1500℃高温下连续运行20-30年，其结构稳定性和热效率影响钢铁企业的成本、能耗与排放。耐火材料是焦炉炉体主体，承担着承受高温、隔绝热量等多重功能。焦炉结构复杂，不同部位工作环境差异大，对耐火材料性能要求不同，如炭化室墙要导热且抗磨损侵蚀，蓄热室格子体要结构完整且高效蓄热传热。如今，现代焦炉朝着大型、长寿、高效、清洁化发展，对耐火材料性能要求更高。因此，深入研究其性能需求、技术演进及未来趋势，对推动炼焦工业技术进步意义重大。本文将剖析关键部位耐火材料要求，回顾发展历程并展望未来。

1 焦炉结构与工况特点

现代焦炉主要由炭化室、燃烧室、蓄热室、斜道区、炉顶及烟道等部分组成，呈双联火道或复热式结构。其工作过程具有以下显著特点：（1）高温连续作业：焦炉在1300-1500℃的高温下连续运行，年作业率高达95%以上^[1]。（2）周期性温度波动：推焦、装煤等操作导致炉墙温度在短时间内发生剧烈变化（可达300-400℃），对材料的热震稳定性构成严峻考验。（3）复杂的化学侵蚀环境：炉内存在CO、CO₂、H₂、CH₄、H₂O等多种气体，以及来自煤和焦炭中的碱金属（K、Na）、硫、磷等有害元素的蒸气，对耐火材料产生化学侵蚀。（4）机械应力与磨损：推焦机的推杆对炭化室墙面产生周期性的机械冲击和摩擦磨损。（5）长期荷重：焦炉高

达10米以上，上部耐火材料需承受巨大的静载荷，在高温下易发生蠕变变形。这些严苛的工况条件共同决定了焦炉用耐火材料必须具备一系列综合性能。

2 焦炉各部位对耐火材料的性能要求

2.1 炭化室

炭化室是煤料干馏成焦炭的场所，其侧墙（炉墙）是焦炉最关键的部位。（1）高导热性：为了提高炼焦效率，缩短结焦时间，炉墙材料必须具有较高的导热系数，以利于热量从燃烧室向炭化室内的煤料传递。（2）优异的高温体积稳定性：在长期高温下，炉墙不能发生显著的残余收缩或膨胀，否则会导致炉墙开裂、窜漏，甚至倒塌。硅砖因其在高温下能形成稳定的鳞石英骨架，具有极小的残余膨胀（通常控制在0.1-0.3%），成为炭化室炉墙的首选材料。（3）良好的热震稳定性：装煤时冷煤与热炉墙接触，造成炉墙内表面温度骤降，产生巨大的热应力。材料必须能抵抗由此产生的裂纹。（4）抗碱金属侵蚀性：煤中的碱金属在高温下挥发，在炉墙较冷部位（约800-1000℃）凝结并与SiO₂反应生成低熔点的硅酸盐（如钾霞石KAlSiO₄），导致炉墙结构疏松、剥落。因此，要求材料具有高纯度、低气孔率以减少侵蚀通道。（5）高温结构强度：在1450℃左右的高温下，仍需保持足够的荷重软化温度和高温抗折强度，以抵抗上部砌体的压力和推焦的机械应力。

2.2 燃烧室

燃烧室位于炭化室两侧，是煤气燃烧提供热量的场所。其火道隔墙与炭化室炉墙共用，因此性能要求与炭化室炉墙基本相同，主要采用优质硅砖。

2.3 蓄热室

蓄热室位于焦炉下部，通过格子砖周期性地蓄积废气热量并预热助燃空气（或煤气）。（1）优异的热震稳定性：格子砖在换向周期（通常20–30分钟）内，温度在200–1300℃之间反复剧烈变化，对热震稳定性要求极高。（2）高热容量与导热性：为了高效蓄热和放热，材料应具有较高的比热容和适中的导热系数。（3）良好的高温体积稳定性：长期在高温下工作，不能发生过大的残余收缩，以免格子体倒塌^[2]。（4）抗粉尘与化学侵蚀：废气中携带的粉尘及碱金属、硫化物等会沉积并侵蚀格子砖。传统上使用黏土砖或高铝砖，但其抗碱侵蚀能力有限。现代大型焦炉趋向于在中上部使用优质高铝砖或低气孔黏土砖，在下部低温区仍可使用普通黏土砖。

2.4 斜道区

斜道区是连接燃烧室与蓄热室的通道，结构复杂，孔道密集，且存在温度梯度。（1）综合性能要求：该区域既要承受上部高温（接近燃烧室温度），又要承受下部周期性温度波动。因此，要求材料兼具硅砖的高温稳定性和黏土砖/高铝砖的热震稳定性。通常采用优质硅砖或特制的复合砖。（2）精确的尺寸与形状：斜道孔的几何形状对气流分布至关重要，要求砖体尺寸精确，烧成收缩小。

2.5 炉顶与烟道

炉顶区温度相对较低（< 1200℃），主要承受装煤车的载荷和装煤时的冲击。通常采用黏土砖或缸砖。烟道区温度更低，主要起导流作用，可使用普通耐火砖或耐火混凝土。

3 焦炉耐火材料的发展历程

3.1 早期阶段（19世纪末–20世纪初）

早期焦炉主要使用黏土砖。黏土砖成本低，热震稳定性好，但其荷重软化温度低（约1300–1350℃），高温下易变形，且残余收缩大，导致炉体寿命短（通常不足10年）。

3.2 硅砖的广泛应用（20世纪30年代至今）

硅砖的出现是焦炉技术的一次革命。硅砖以SiO₂为主要成分（> 93%），其最大优点是在1450℃左右长期使用时，体积几乎不收缩，反而有微小的膨胀，能有效抵消砌筑时的缝隙，使炉体结构致密、坚固^[3]。这使得焦炉寿命得以大幅延长至20–30年。硅砖成为炭化室、燃烧室及斜道区的标准材料。

3.3 高性能硅砖的研发（20世纪80年代至今）

为了应对更大容积焦炉（如7米以上顶装焦炉、6米以上捣固焦炉）和更严苛的环保要求，对硅砖提出了更

高要求。通过优化原料（采用高纯度石英、添加矿化剂如FeO、CaO）、改进生产工艺（高压成型、精准控温烧成），开发出真密度更高（> 2.38g/cm³）、气孔率更低（< 18%）、常温耐压强度更高（> 30MPa）、残余石英含量更低（< 1.5%）的优质硅砖。这些高性能硅砖显著提升了抗碱侵蚀能力和整体结构强度。

3.4 蓄热室材料的升级

针对蓄热室格子砖的碱侵蚀问题，开发了低气孔黏土砖、高铝砖（Al₂O₃含量75%以上）以及含铬、含锆的特种耐火材料。这些材料通过提高纯度、降低气孔率、引入稳定相等方式，有效延长了蓄热室的使用寿命。

4 当前面临的主要挑战

尽管焦炉耐火材料技术取得了长足进步，但在实际应用中仍面临诸多挑战：（1）高温蠕变与结构变形：在长期高温和应力作用下，即使是优质硅砖也会发生缓慢的蠕变变形，导致炭化室炉墙向炭化室方向弯曲（“炉墙变形”），影响推焦操作，严重时需停炉大修。（2）碱金属侵蚀的持续威胁：随着炼焦煤资源的劣质化，煤中碱金属含量有上升趋势，加剧了对硅砖的侵蚀。侵蚀产物不仅破坏砖体结构，还会堵塞炉墙气孔，降低导热效率。（3）热应力损伤累积：频繁的推焦-装煤操作导致的热冲击，会在炉墙内部产生微裂纹。这些微裂纹随时间累积、扩展，最终可能导致炉墙局部剥落或穿孔。（4）环保与碳减排压力：耐火材料的生产是高能耗、高排放过程。传统硅砖烧成温度高达1430℃，能耗巨大。如何开发低碳、绿色的制备工艺，是行业面临的共同课题。（5）长寿化与经济性的平衡：追求超长寿（> 30年）焦炉需要更高性能的耐火材料，但其成本也显著增加。如何在寿命、性能与成本之间取得最佳平衡，是工程应用中的关键考量。

5 未来发展趋势

5.1 高纯化与微结构精准调控

未来的研发重点将从宏观性能优化深入到微观结构设计层面。通过采用经过深度提纯的石英砂或人工合成的高纯原料，严格控制Al₂O₃、Fe₂O₃及碱金属氧化物等杂质的含量，可以从源头上切断有害反应的路径，显著提升材料的抗化学侵蚀能力。在此基础上，借助现代材料科学的先进手段，如纳米技术、原位反应合成等，对材料的显微结构进行精准调控。例如，通过引入纳米级添加剂促进烧结致密化，降低气孔率；或通过设计特定的晶界相和微裂纹网络，实现“以柔克刚”的增韧机制，从而在不牺牲高温性能的前提下，大幅提升材料的热震稳定性。这种从“成分控制”到“结构设计”的转变，

将是提升焦炉耐火材料综合性能的根本途径。

5.2 复合化与功能梯度设计

单一材质的耐火材料已难以满足焦炉复杂部位日益多元化的性能需求。未来的解决方案将更多地依赖于复合化与功能梯度设计理念。一方面,通过在硅砖基体中引入少量高熔点、高导热或高韧性的第二相(如碳化硅SiC、氧化锆ZrO₂、莫来石等),可以制备出兼具多种优异性能的复合材料。例如, SiC的引入不仅能提高导热性,还能增强抗侵蚀和耐磨能力。另一方面,功能梯度材料(Functionally Graded Materials, FGM)的概念为解决炭化室炉墙的矛盾需求提供了全新思路^[4]。通过先进的成型与烧结技术,可以制备出成分和微观结构沿炉墙厚度方向连续变化的砖体:面向炭化室一侧富含高导热、高耐磨、强抗碱侵蚀的组分;而面向燃烧室一侧则侧重于高温强度和体积稳定性。这种“按需定制”的智能材料,能够最大化材料在不同服役环境下的效能,代表了焦炉耐火材料设计的未来方向。

5.3 智能化监测与寿命预测

将现代信息技术深度融入焦炉耐火材料的全生命周期管理,是实现焦炉智能化运维的关键。未来,可在关键部位的耐火砖中预埋微型、耐高温的传感器(如光纤光栅温度传感器、声发射传感器),实时、在线地监测炉衬内部的温度场、应力场及损伤状态。这些海量数据将被传输至焦炉的数字孪生模型中。该模型基于物理机理和历史运行大数据构建,能够利用人工智能算法,动态模拟和预测炉衬的侵蚀速率、变形趋势及剩余寿命。这种从传统的“计划维修”模式向“预测性维护”模式的转变,不仅可以避免非计划停机带来的损失,还能优化维修策略,精准投入资源,从而最大化焦炉的运行效率和经济效益。

5.4 低碳制备与绿色工艺

响应国家“碳达峰、碳中和”战略,耐火材料制造业必须进行深刻的绿色转型。未来的技术革新将聚焦于低碳制备工艺的开发与应用。这包括大力推广富氧燃烧、窑炉余热高效回收、微波或等离子体辅助烧结等节能技术,以显著降低烧成过程的能耗。同时,积极探索低温烧结对配方体系,通过优化矿化剂和烧结助剂,将硅砖的烧成温度有效降低,从而直接减少化石燃料消耗和CO₂排放。更长远地看,整个生产过程的能源结构也将向

清洁化转变,逐步采用电能、绿氢等零碳或低碳能源替代传统的煤炭和天然气,从根本上实现耐火材料生产的绿色化。

5.5 废旧耐火材料的循环利用

焦炉大修产生的大量废旧耐火材料,若采用传统填埋方式处理,不仅是对宝贵矿产资源的巨大浪费,也会带来环境污染问题。构建完善的废旧耐火材料回收与循环利用体系,是实现行业可持续发展的必由之路。未来的工作重点在于开发高效的分类、破碎、除杂和提纯技术,将废旧硅砖、高铝砖等按材质和污染程度进行精准分离。经过处理的再生骨料和细粉,可按科学配比重新用于生产新的耐火制品,例如用于焦炉的非关键部位(如烟道、部分炉顶)或其他对性能要求相对较低的工业窑炉。通过这种“资源—产品—再生资源”的闭环循环经济模式,不仅能大幅降低对原生矿产资源的依赖,还能显著减少固体废弃物的排放,实现经济效益与环境效益的双赢。

6 结语

焦炉用耐火材料是保障现代炼焦工业高效、长寿、绿色运行的基石。从早期的黏土砖到如今的高性能硅砖,其发展历程深刻反映了材料科学与冶金工程的深度融合。面对焦炉大型化、长寿化和清洁化带来的新挑战,未来焦炉耐火材料的发展必须突破传统思维,走向高纯化、复合化、智能化和绿色化。通过微结构精准设计、功能梯度理念、智能监测技术、低碳制备工艺以及循环利用体系的构建,新一代焦炉耐火材料将不仅能更好地满足严苛的服役要求,更能对整个钢铁工业的可持续发展做出重要贡献。这需要材料科学家、耐火材料制造商、焦化工程设计院及钢铁企业的紧密合作与持续创新。

参考文献

- [1]王伟,李杨,赵云刚,等.焦炉用耐火材料的改进及应用[J].煤化工,2024,52(04):16-19.
- [2]李增明.焦炉热修用耐火材料的优化改进[J].耐火与石灰,2022,47(04):58-59.
- [3]韩藏娟,张美杰.干熄焦炉斜道区耐火材料及损毁机制研究进展[J].耐火材料,2022,56(03):267-271.
- [4]郑晓明.浅析大型焦炉用耐火材料展望[J].冶金管理,2019,(17):29-30.